УДК 621.314

# КОММУТАТОР ДЛЯ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ

С.В. Пустынников

Томский политехнический университет
E-mail: nosov@elti.tpu.ru

*Проанализирована работа тиристорного коммутатора для размыкания цепей постоянного тока с индуктивной нагрузкой. Получены расчетные соотношения для напряжения заряда рабочих конденсаторов и времени размыкания при заданных параметрах размыкаемой цепи и тиристорного коммутатора. Результаты расчета подтверждены экспериментально.*

В [1] показано, что размыкание цепей постоянного тока с индуктивностью за время $\Delta t \to 0$ приводит к изменению потокосцепления индуктивности от начального значения $\Psi = L \cdot i_0$ до нуля. При этом теоретически в индуктивности возникает импульс перенапряжения $u_L = \frac{d\Psi}{dt}$ бесконечной величины. На практике коммутация цепей постоянного тока, содержащих индуктивную нагрузку или имеющих внутреннюю индуктивность – линий электропередач, линий связи, цепей с генераторами и двигателями постоянного тока и т.д., осуществляется при помощи электромеханических устройств – пускателей, контакторов и т.п., имеющих конечное время срабатывания $\Delta t$, что сопровождается возникновением дуги на размыкающих контактах, а также перенапряжением на индуктивности, в 5...7 раз превышающем напряжение источника питания.

Автором было разработано устройство для размыкания цепей постоянного тока с внутренней индуктивностью или с индуктивностью в виде сопротивления нагрузки, на основе тиристоров (рис. 1), которое не имеет электромеханических коммутаторов [2].

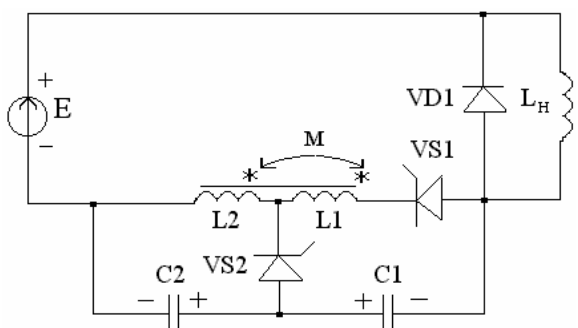



***Рис. 1.*** *Принципиальная схема тиристорного коммутатора*

Подключение нагрузки $L_H$ к источнику постоянной ЭДС $E$ осуществляется при помощи тиристора VS1, при этом ток течет через нагрузку $L_H$, тиристор VS1, и последовательно включенные индуктивно-связанные катушки $L1$ и $L2$, которые имеют согласное включение и одинаковые параметры. Известно, что для отключения тиристора необходимо обеспечить переход тока в нем через нулевое значение, поэтому при отключении нагрузки от источника срабатывает тиристор VS2, который приводит к разряду двух одинаковых конденсаторов $C1$ и $C2$, предварительно заряженных от внешнего источника напряжения (не показан) до одинакового напряжения через индуктивно-связанные катушки $L1$ и $L2$, включенные при разряде конденсаторов встречно. При этом потокосцепление в катушке индуктивности $L2$ уменьшается до нуля, и ток в тиристоре VS1 переходит через нулевое значение, что приводит к отключению тиристора VS1 и к размыканию цепи с нагрузкой $L_H$. Запасенная в нагрузке энергия шунтируется диодом VD1. Преимуществом данной схемы является то, что на переходный процесс при разряде конденсаторов не оказывают влияние параметры нагрузки $L_H$. Очевидно, что параметры конденсаторов $C1$ и $C2$, а также индуктивностей $L1$ и $L2$ должны обеспечивать колебательный переходный процесс, который с учетом одинаковых значений разрядных токов в конденсаторах при встречном включении индуктивностей будет описываться дифференциальным уравнением для тока $i_L$ в тиристоре VS1:

$$L \cdot C \cdot \frac{d^2 i_L}{dt^2} + R \cdot C \cdot \frac{di_L}{dt} + i_L = 0.$$

Здесь $L=L1-M$; $C=C1$; $R$ – активное сопротивление каждой из катушек индуктивности; $M=K \cdot \sqrt{L1 \cdot L2} = K \cdot L1$ – взаимная индуктивность, где $0 \le K \le 1$ – коэффициент связи катушек. Решение данного уравнения согласно классическому методу расчета переходных процессов [3] записывается в виде суммы принужденной и свободной составляющих:

$$i_L = i_{Lnp} + i_{Lсв} = I + A \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega_{св} \cdot t + \gamma),$$

где $A$ и $\gamma$ – постоянные интегрирования, $\delta$ – коэффициент затухания, а $\omega_{св}$ – угловая частота колебаний тока свободной составляющей. Принимаем величины тока в индуктивности и напряжения на емкости до коммутации тиристора VS2: $i_L(0_-)=I$; $u_C(0_-)=U$, из характеристического уравнения $L \cdot C \cdot P^2 + R \cdot C \cdot P + 1 = 0$ определим

$$\delta = -\frac{R}{2 \cdot L}, \omega_{св} = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C} - \frac{R^2}{4 \cdot L^2}}.$$

Условием колебательного переходного процесса является неравенство $\frac{1}{L \cdot C} \ge \frac{R^2}{4 \cdot L^2}$, следовательно для параметров индуктивностей должно выполняться условие $L \ge \frac{R^2 \cdot C}{4}$. Напряжение на индуктивности в первый момент времени $t=0_+$ после коммутации определим по второму закону Кирхгофа:

$$u_L(0_+) = -u_C(0_-) - i_L(0_-) \cdot R = -U - I \cdot R.$$

Постоянные интегрирования найдем из решения системы двух уравнений в момент времени $t$=0$_+$:

$$i_L(0_-) = I + A \cdot \sin\gamma;$$

$$u_L(0_+) = -\delta \cdot L \cdot A \cdot \sin\gamma + L \cdot \omega_{св} \cdot A \cdot \cos\gamma;$$

откуда получаем: $\gamma$=0, $A = -\dfrac{U + I \cdot R}{L \cdot \sqrt{\dfrac{1}{L \cdot C} - \dfrac{R^2}{4 \cdot L^2}}}$,

окончательно ток переходного процесса в тиристоре VS1 составит:

$$i_L = I - \frac{U + I \cdot R}{L \cdot \sqrt{\dfrac{1}{L \cdot C} - \dfrac{R^2}{4 \cdot L^2}}} \cdot e^{-\frac{R}{2L} \cdot t} \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{1}{L \cdot C} - \frac{R^2}{4 \cdot L^2}} \cdot t\right).$$

Поскольку $\gamma$=0, то переход тока $i_L$ через нулевое значение осуществляется за время

$$t_1 = \frac{T_{св}}{4},$$

где $T_{св} = \dfrac{2 \cdot \pi}{\omega_{св}}$ – период колебаний тока свободной составляющей, откуда получаем

$$t_1 = \frac{1{,}57}{\sqrt{\dfrac{1}{L \cdot C} - \dfrac{R^2}{4 \cdot L^2}}},$$

при этом $\sin(\omega_{св} \cdot t_1)$=1. Из условия равенства $i_L$=0 определим величину напряжения заряда конденсаторов, обеспечивающего выполнение данного условия при заданных параметрах схемы $R$,$L$,$C$, а также при известном токе $I$:

$$U = I \cdot \left(L \cdot \sqrt{\frac{1}{L \cdot C} - \frac{R^2}{4 \cdot L^2}} \cdot e^{-\frac{R}{2L} t_1} - R\right).$$

При небольших значениях $R$ в сильноточных цепях постоянного тока получаем приближенные расчетные формулы для напряжения заряда конденсаторов и времени коммутации тиристора VS1:

$$U \approx I \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}; \quad t_1 \approx 1{,}57 \cdot \sqrt{L \cdot C}.$$

Так, например, при $L$=0,1 Гн, $C$=500 мкФ, $R$=0,1 Ом для размыкания цепи с током $I$=100 А, независимо от величины индуктивности нагрузки $L_H$, рабочее напряжение конденсаторов будет равно $U$=1414 В, время размыкания цепи составит $t_1$=0,011 с.

Экспериментальные исследования модели тиристорного коммутатора были проведены при помощи программы Electronics Workbench для схемы, рис. 2, с индуктивной нагрузкой $L_H$=5 Гн, рабочим напряжением источника питания $U$ =200 В. Ток в нагрузке $I$ составлял102 А.

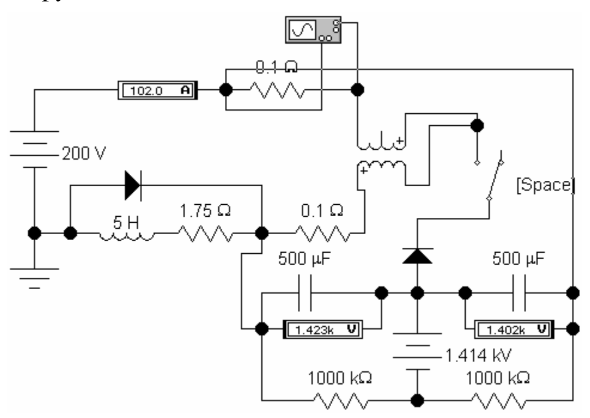



**Рис. 2.** *Экспериментальная схема тиристорного коммутатора*

На рис. 3 показана осциллограмма тока размыкаемой цепи. Время перехода тока через нулевое значение (средняя линия на экране осциллографа) с момента срабатывания ключа составляет $t_1$=0,011 с, что полностью совпадает с результатами расчета. В данной схеме отсутствует тиристор VS1, поэтому ток нагрузки после разряда конденсаторов восстанавливает своё первоначальное значение.

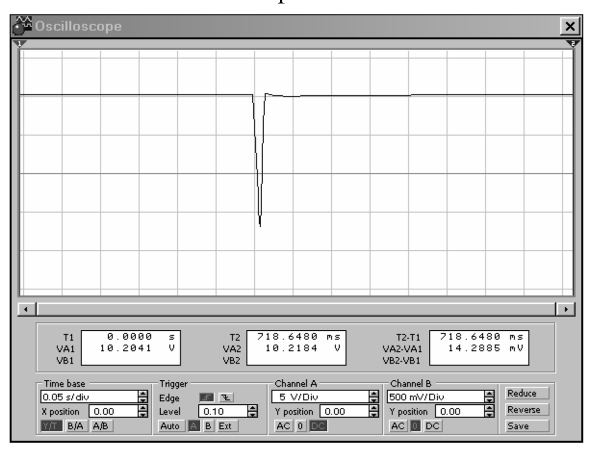



**Рис. 3.** *Осциллограмма тока в нагрузке*

Таким образом, исследованная схема тиристорного коммутатора может быть использована при коммутации электросиловых цепей постоянного тока с индуктивной нагрузкой или внутренней индуктивностью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галинский П.П., Кононов А.П. и др. Теоретические основы электротехники в задачах. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 1975. – 294 с.
2. Пат. 2257004 РФ. МПК$^7$ Н03К 17/00. Тиристорный выключатель постоянного тока / С.В. Пустынников. Заявлено 25.05.2004; Опубл. 20.07.2005, Бюл. № 20. – 2 с.: ил.
3. Зевеке Г.В., Ионкин П.А. и др. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.